

水洞沟水库二维水流运动数值模拟

杨程,李春光,景何仿,吕岁菊

(北方民族大学土木工程学院,宁夏银川 750021)

摘要:为了预测未来几年水洞沟水库的冲淤情况,在考察库区水流运动规律的基础上,建立平面二维水流运动数学模型,采用非结构网格的有限体积法,利用实测流场数据验证了所建数学模型的正确性。采用该模型对不同工况下水洞沟水库的平面二维水流运动进行数值模拟。结果表明:当进水量与取水量相同且不变时,随着水位的下降,库区流速增大;进水直接流向取水口,然后逐渐向右岸偏移,再向左岸偏移,最后转变为贴着左岸流向取水口;取水口左侧回流区逐渐变小,右侧回流区受进水影响逐渐增大。当进水量大于取水量且不变时,随着水位的下降,库区流速增大,进水主流先向尾坝流动,逐渐偏移为向右岸流动,取水口附近流场受进水影响逐渐增大。通过对不同工况的水流运动数值模拟,得到库区水流运动基本规律,结合进水口、取水口泥沙含量实测数据对库区冲淤情况进行分析,并提出了一些水库运行管理的建议。

关键词:水洞沟水库;平面二维水流模型;非结构网格;有限体积法;数值模拟

中图分类号:TV145

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2013)06-0056-05

Two dimensional numerical simulation of the flow in Shuidonggou Reservoir//YANG Cheng, LI Chungang, JING Hefang, LÜ Suiju(*College of Civil Engineering, Beifang University for Nationalities, Yinchuan 750021, China*)

Abstract: In order to predict the sedimentation deposition in the Shuidonggou Reservoir in next few years, the flow in this reservoir is studied using a two dimensional (2-D) hydraulic mathematical model, and the governing equations are modeled with finite volume method (FVM) on unstructured grids. Using the measured data to verify the correctness of the model, and then the 2-D flow movement of several different conditions was simulated. The results show that: when the amount of the water inflow and with the same quantity of the water drawn are the same and unchanged, as the water level drops, water flow velocity increases in the reservoir; the water directly flows to the water intake point, gradually shift to the right bank deviation, and then shift to the left, gradually transformed along the left bank and flow to the intake; the recirculation zone on the left of the water intake point becomes smaller, and the effects of the influent on the right recirculation zone increases gradually. When the amount of the water inflow and quantity of water drawn are not the same and unchanged, as the water level drops, water flow velocity increases in the reservoir; the water directly flows to the tail dam, and then gradually to the right bank deviation, and the effects of the influent on the water intake point increases gradually. Through the simulation of different conditions, movement of the flow in the reservoir was obtained. Combined the measured sediment concentration of the water inlet and water intake, the sedimentation deposition in the reservoir is analyzed and some management suggestions are put forward.

Key words: Shuidonggou Reservoir; 2-D hydraulics model; unstructured grids; the finite volume method; numerical simulation

水洞沟水库是内蒙古上海庙能源化工基地、宁夏红墩子能源化工基地供水工程调蓄水库,提供生产、生活用水。水库以黄河为取水水源,设计总库容为1039万 m^3 。水库淤积与水库运行方式有着密切的关系,采用合理的运行方式可减少库区淤积量,从而延长水库的使用寿命。泥沙运动与水流运动有着

密切的联系,所以应先弄清楚库区水流运动的规律。本文建立了平面二维水流数学模型,运用非结构网格有限体积法对多种工况下水库平面二维水流运动进行数值模拟研究,以期找到水库水流运动的规律,为进一步研究库区的泥沙运动打下基础。

基金项目:国家自然科学基金(91230111);宁夏高等学校科学技术研究资助项目(2011JY005);北方民族大学科学研究资助项目(2013XYZ026)

作者简介:杨程(1983—),男,河南驻马店人,博士,主要从事计算水力学研究。E-mail:yangcheng111@163.com

通信作者:李春光(1964—),男,河南驻马店人,教授,博士,主要从事计算水力学研究。E-mail:cglizd@hotmail.com

1 数学模型及其离散

沿水深平均的平面二维 RNG $k-\varepsilon$ 紊流数学模型^[14]包括连续性方程、 x 方向动量方程、 y 方向动量方程、 k 方程和 ε 方程,其通用方程为

$$\frac{\partial(h\Phi)}{\partial t} + \text{div}(h\Phi U) = \text{div}(\Gamma_\phi \text{grad}\Phi) + S_\phi \quad (1)$$

$$k = 1.5(IU_{in})^2 \quad (2)$$

$$\varepsilon = C_\mu^{0.75} \frac{k^{1.5}}{0.1R} \quad (3)$$

式中: h 为水深; Φ 为通用变量; U 为网格单元的流速矢量; Γ_ϕ 为扩散系数; S_ϕ 为源项; I 为紊动强度,一般可取为 10%; U_{in} 为进口断面平均流速,可根据流量与断面平均流速的关系计算得到; R 为水力半径。其他物理量符号含义及其计算公式见文献[2]。

模型采用格心格式的中心有限体积法离散,将变量存储在单元的中心,单元的边界为控制体。对式(1)在控制单元上求体积分并利用高斯定理将体积分转化为面积分:

$$\int_A \frac{\partial(h\Phi)}{\partial t} dA + \int_A h\Phi U \cdot n dA = \int_A \Gamma_\phi \text{grad}\Phi \cdot n dA + \int_A S_\phi dA \quad (4)$$

式中: A 为控制单元的面积; n 为网格界面上的法向量。

通过构造辅助点,利用有限体积法可对式(4)进行离散,其中瞬态项和源项的离散与结构网格一样,即瞬态项采用向前差分,源项采用线性化处理,具体过程可参见文献[5]。单元面的各通量项的离散表达式及压力校正方程的离散参见文献[6]。

2 数值计算方法

2.1 模拟区域及网格剖分

水库运行初期地形的详细描述见文献[7],水库的设计水位为 1180 m,本文选择 1183 m 等高线作为计算边界,则模拟区域东西长约 1.2 km,南北宽约 1 km。水洞沟水库的模拟区域及取水口、进水口等位置如图 1 所示。采用前沿推进法^[8-9]在计算区域内生成三角形网格,共有 3 567 个节点,6 841 个单元,如图 2 所示。

2.2 边界处理

进口边界给定流量;出口边界给定水位、流量;两岸边界按照无滑移的固定边界处理。动边界采用干湿边界^[10-11]处理。

2.3 计算时间步长

为了保证计算时模型的稳定,时间步长的选取

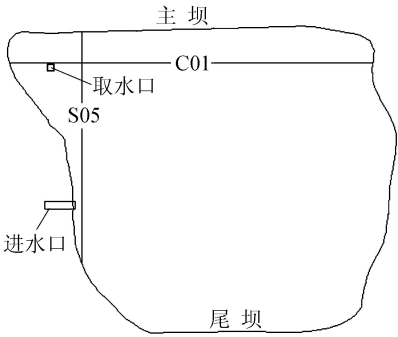


图 1 模拟区域示意图

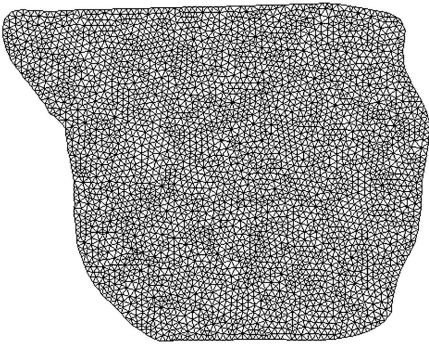


图 2 网格划分示意图

需要满足 CFL (courant friedrichs levy) 线性稳定条件^[12-13]:

$$\Delta t = \frac{C_r}{\max_{i=1,2,\dots,N} \left(\frac{A_i}{3 \max_{k=1,2,3} |\lambda_k L_k|} \right)} \quad (5)$$

式中: N 为单元数; A_i 为第 i 个单元的面积; λ_k 为垂直于第 k 条边的特征值; L_k 为第 i 个单元的第 k 条边长; C_r 为柯朗数,需满足 $C_r < 1$, 本文在计算中选取 $C_r < 0.8$ 。

3 模型的验证

水洞沟水库目前的运行情况为:取水量 1 万 m^3/d ,进水量 60 万 m^3/d 。规划一期取水量 20 万 m^3/d ,二期取水量 40 万 m^3/d ,设计最高水位 1 180 m。水库不同运行方式对水库淤积的影响不同,在不考虑蒸发的情况下,首先根据实测资料对建立的模型进行验证,然后根据取水量与进水量是否相同,分别设计了几种不同运行工况,对这些工况下的流场进行模拟计算与分析。

当前水库运行情况为每天连续不定期进水,其中取水量为 1 万 m^3/d ,进水量为 60 万 m^3/d 。进水第 7 天时测量流速,进水前初始水位为 1 168 m,进水后水位为 1 174.4 m。

使用本文建立的平面二维水流数学模型进行数值模拟,以断面 C01 和断面 S05 为例(断面位置见图 1),将断面垂向平均流速的模拟值与实测值进行对比,如图 3 所示。由图 3 可知模拟值与实测值比

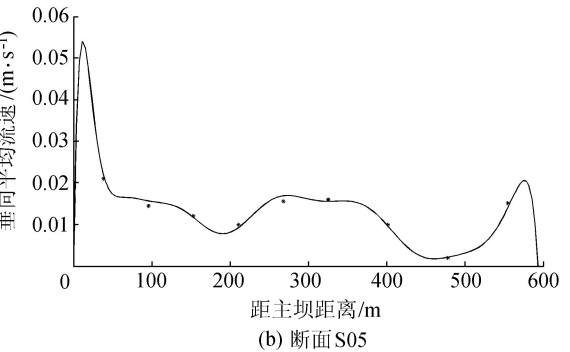
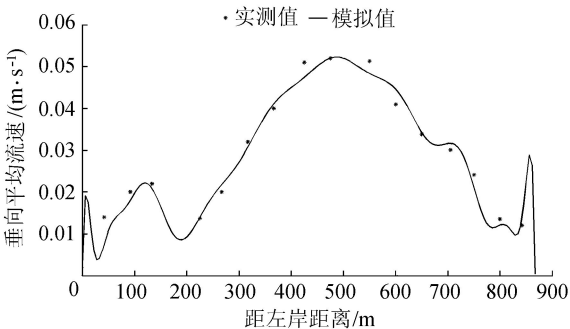


图3 断面垂向平均流速对比

较吻合,说明所建立的平面二维水流数学模型可用于水洞沟水库平面二维水流运动数值模拟。

4 数据模拟结果及分析

4.1 进水量与取水量相同

设计了3种取水量(进水量),分别为1万 m³/d、20万 m³/d和40万 m³/d,其中每种情况又设计了高、中、低3种运行水位,水位分别为1179.0 m、1174.4 m和1170.0 m。各工况详细参数如表1所示,流场如图4所示。

表1 进水量与取水量相同时各工况参数

工况	取水量/ (万 m³ · d ⁻¹)	进水量/ (万 m³ · d ⁻¹)	运行水位/m
1-1	1	1	1179.0
1-2	1	1	1174.4
1-3	1	1	1170.0
2-1	20	20	1179.0
2-2	20	20	1174.4
2-3	20	20	1170.0
3-1	40	40	1179.0
3-2	40	40	1174.4
3-3	40	40	1170.0

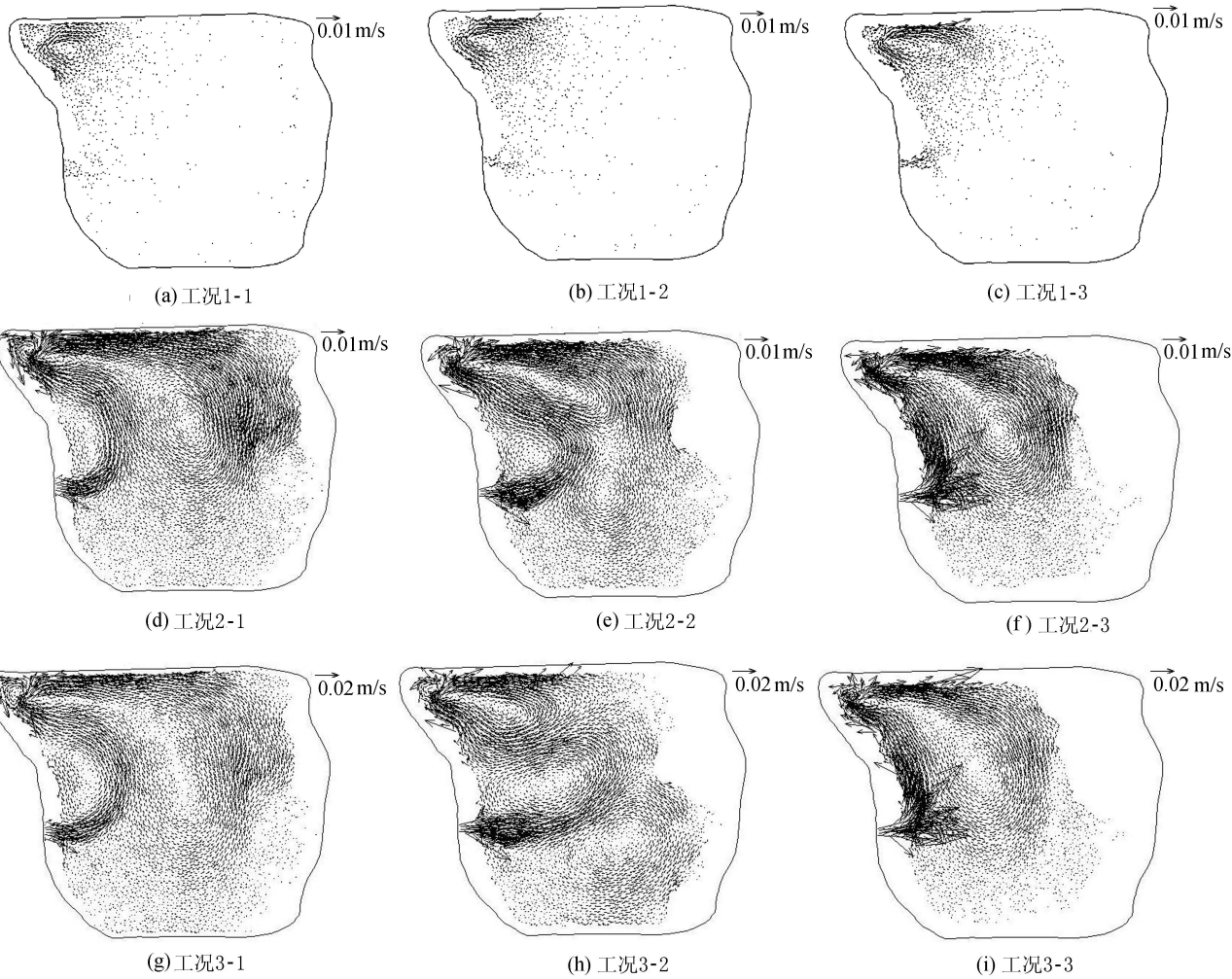


图4 进水量与取水量相同时各工况流场

由图4可知:①当进水量和取水量均为1万m³/d时,库区流速和进库泥沙量都非常小,故此时库区地形变化可以忽略;②在水位不变的情况下,随着进水量和取水量的增加,库区流速逐渐增加;③进水量和取水量相同且不变时,随着运行水位的下降,库区流速逐渐增大;进水形成的主流直接流向取水口,然后逐渐向右岸偏移,再向左岸偏移,最后转变为贴着左岸流向取水口;取水口左侧回流区逐渐变小,右侧回流区受进水影响逐渐增大。

4.2 进水量大于取水量

水库一期、二期取水量分别设计为20万m³/d和40万m³/d,再根据进水量和进水后水位的不同分为6种工况。各工况详细参数如表2所示,流场如图5所示。

表2 进水量与取水量不同时各工况参数

工况	取水量/ (万 m ³ · d ⁻¹)	进水量/ (万 m ³ · d ⁻¹)	进水后 水位/m
4-1	20	40	1179.0
4-2	20	40	1174.4
4-3	20	60	1179.0
4-4	20	60	1174.4
5-1	40	60	1179.0
5-2	40	60	1174.4

由图5可知:①当进水量和取水量不变时,随着水位的下降,流速增大。水位不变时,随着进水量和取水量的增大,流速变大。②水位在1179.0m时,水流进入库区后很快偏向尾坝流动,随着进水量和取水量的增加,取水口右侧的回流区逐渐向主坝偏移,进水口主流上方的回流区逐渐变大。③水位在

1174.4m时,进水主流直接冲向右岸,并在水流的上下游各形成一个回流区,在此水位下随着进水量和取水量的增加,库区流速增大。

5 库区冲淤分析及运行建议

在进水口和取水口多次采集水样,分析得出进水口含沙量为1.031kg/m³,中值粒径为18.28μm;取水口含沙量为0.021kg/m³,中值粒径为0.94μm。

泥沙是随着水流运动而运动的,下面根据模拟得到的库区水流运动规律,结合实测泥沙数据对库区淤积情况进行分析,并提出运行管理建议。

a. 进水量与取水量相同。当进水量和取水量均为1万m³/d时,流速非常小,故进库的泥沙绝大多数将沉淀在距进水口不远的地方。结合实测进口泥沙含量可知,此时进库泥沙量很少,故对库区地形的影响非常有限,几乎可以忽略。进水量和取水量增大,流速也增大,水流挟沙力也相应增大。水位在1179.0m和1170.0m时,进水主流直接流向取水口;水位在1179.0m时,主流与左岸有一定距离,结合实测取水口泥沙含量可知,大多数泥沙将淤积在主流两侧的回流区及取水口右侧的回流区内;水位在1170.0m时,取水口右侧回流区内将淤积。水位在1174.4m时,随着取水量的增大,主流逐渐指向右岸流动;大颗粒泥沙将淤积在距进水口不远的库区,其余泥沙将主要淤积在主流和取水口附近的回流区内。

由于水洞沟水库的流速小于河道型水库的流

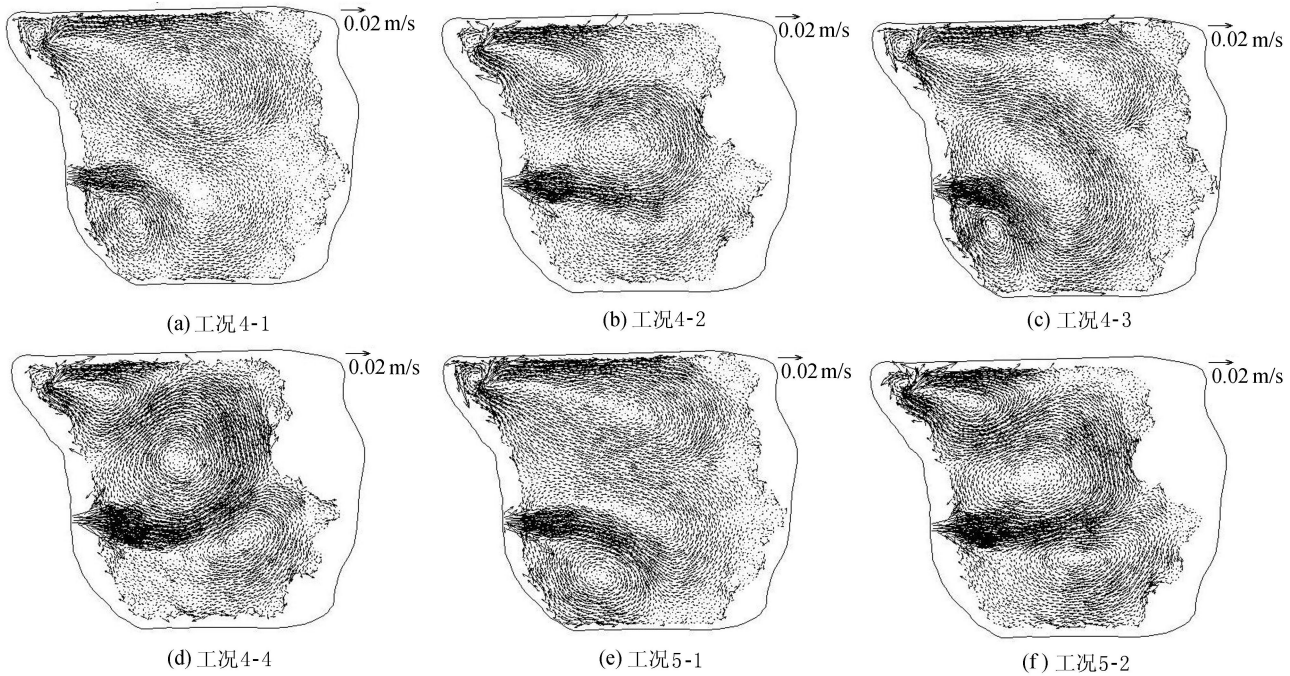


图5 进水量大于取水量时各工况流场

速,进库的大颗粒泥沙将主要淤积在距进水口不远的库区,其余泥沙主要淤积在进水主流和取水口附近的回流区内;且由于进水对尾坝附近的影响较小,进水口以北的淤积量应大于进水口以南的淤积量;进水口附近两岸及库底、取水口下面的库底将被冲刷。

b. 进水量与取水量不同。设计了两种水位,即 1 179.0 m、1 174.4 m。由模拟结果可知:水位在 1 179.0 m 时,进水主流指向尾坝流动,此时对进水口和尾坝之间的流场影响较大,且由于取水量相对较大,故大部分泥沙将淤积在进水主流两侧的回流区内;水位在 1 174.4 m 时,进水主流指向右岸流动,随着取水量的增大,进水口附近流场受取水的影响也增大,大部分泥沙将淤积在进水两侧的回流区附近,且由于受到取水的影响,进水口以北的淤积量应大于进水口以南的淤积量。

由以上分析,针对水库目前的运行情况以及一期、二期的设计情况提出以下运行建议:①对于目前情况,取水量只有 1 万 m^3/d ,选择间隔进水方式,进水量可选择 40 万 m^3/d 或 60 万 m^3/d ,运行最高水位为 1 174.0 ~ 1 175.0 m。由于进水量较大,可将泥沙尽量带向右岸,从而减少进水口和取水口附近的泥沙淤积量。②对于一期取水量(20 万 m^3/d),可以根据黄河不同时期的含沙量设计选择进水时间,进水量选择 60 万 m^3/d ,运行最高水位为 1 177.0 m。可尽量使进水主流指向右岸或者主坝流动,从而使进库部分泥沙淤积在右岸附近。③对于二期取水量(40 万 m^3/d),运行时无法间隔进水,考虑到黄河汛期泥沙含量较高,故可在含沙量高时采取进水量和取水量相同的方式,含沙量低时采取进水量大于取水量的方式。考虑到夏季降雨因素,可将运行水位控制在 1 179.0 m 以内。

6 结 语

本文建立了平面二维水流数学模型,并利用实测库区流场数据对该模型进行验证,结果表明模型是合理的。运用该数学模型对多种工况下水洞沟水库的平面二维水流运动进行数值模拟,得到库区平面二维水流的运动规律,结合进水口和取水口泥沙含量的实测值,对库区泥沙冲淤进行分析并提出运行管理建议。

在本文的基础上,后续可进行以下研究:①增加泥沙模型对库区水沙运动的数值模拟研究;②根据数值模拟的结果,考虑取水量、蒸发量、泥沙含量、冬季结冰期等因素,对水库运行方案进行研究。

参考文献:

[1] 王福军. 计算流体动力学分析[M]. 北京:清华大学出版社,2006.

[2] 吴修广. 曲线坐标系下水流和污染物扩散输移的湍流模型[D]. 大连:大连理工大学,2004.

[3] 景何仿,李春光. 黄河大柳树—沙坡头河段典型弯道水流运动平面二维数值模拟[J]. 水利水电科技进展, 2011, 31(4): 61-64. (JING Hefang, LI Chunguang. Two-dimensional numerical simulation of flow motion in typical bends of Daliushu—Shapotou Reach of Yellow River [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011, 31(4): 61-64. (in Chinese))

[4] 景何仿,李春光. 黄河上游连续弯道水流运动及泥沙运移数值模拟研究[M]. 郑州:黄河水利出版社,2012.

[5] LAI X J, WANG D G, CHEN Y. Pressure correction method on unstructured grids[J]. Hydrodynamics, 2004, 16(3): 316-324.

[6] 赖锡军,汪德瓠,傅源方. 非结构同位网格 SIMPLE 类算法收敛性能比较[J]. 空气动力学报, 2004, 22(3): 289-294. (LAI Xijun, WANG Deguan, FU Yuanfang. Convergence performance of SIMPLE-like algorithm on unstructured grid [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2004, 22(3): 289-294. (in Chinese))

[7] 杨程,李春光,吕岁菊. 水洞沟水库典型断面实测数据分析[J]. 中国水土保持, 2012(11): 55-57. (YANG Cheng, LI Chunguang, LÜ Suiju. Analysis on the measured data of the typical cross-sections in Shuidonggou Reservoir [J]. Soil and Water Conservation in China, 2012(11): 55-57. (in Chinese))

[8] 陶文铨. 计算传热学的近代进展[M]. 北京:科学出版社,2001.

[9] 孙立胜. 基于前沿推进技术的自适应曲面三角形和四边形网格生成方法研究[D]. 杭州:浙江大学,2010.

[10] 马方凯. 河口三维水沙输移过程数值模拟研究[D]. 北京:清华大学,2010.

[11] 王娜. 胶州湾二维水动力及水质数值模拟研究[D]. 青岛:青岛理工大学,2008.

[12] 岳志远,曹志先,李有为,等. 基于非结构网格的非恒定浅水二维有限体积数学模型研究[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2011, 26(3): 359-367. (YUE Zhiyuan, CAO Zhixian, LI Youwei, et al. Unstructured grid finite volume model for two-dimensional shallow water flows [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics; 2011, 26(3): 359-367. (in Chinese))

[13] 戴阳豪. 基于非结构网格的二维水流数值模拟研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2012.

(收稿日期:2013-01-10 编辑:骆超)